Prof.ª Elisabete Nakoneczny Moraes

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA

FÍSICA DOS SEMICONDUTORES & FORMAÇÃO DIODO SEMICONDUTOR

T0REVISÃO

Curitiba, 1° de outubro de 2024

AGENDA

1. REVISÃO: FÍSICA DOS SEMICONDUTORES
2. FORMAÇÃO DO DIODO SEMICONDUTOR

RELEMBRANDO

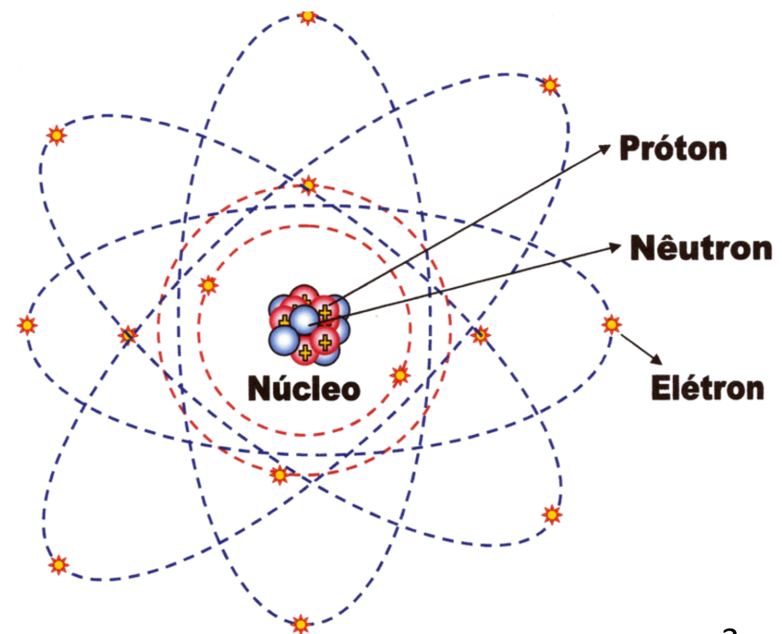
Condutor ➔ material que sustenta um fluxo de cargas, quando uma fonte de tensão é aplicada através de seus terminais.

Isolante ➔ material que oferece um nível muito baixo de condutividade sob pressão de uma fonte de tensão aplicada.

Semicondutor ➔ material que possui um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e um condutor.

Valores de Resistividade Típicos

Condutor	*Semicondutor*	*Isolante*
$\rho \cong 10^{-6}\ \Omega.cm$ (cobre)	$\rho \cong 50\ \Omega.cm$ (germânio) $\rho \cong 50\ .10^{3}\Omega.cm$ (silício)	$\rho \cong 10^{12}\ \Omega.cm$ (mica)



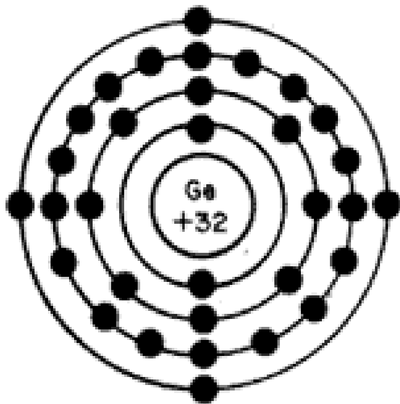
Capítulo 1 do Boylestad: seções:1.1 a 1.6
Capítulo 3 do Sedra: seções 3.1 a 3.3

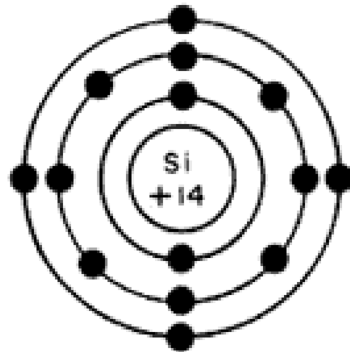
Cristal intrínseco

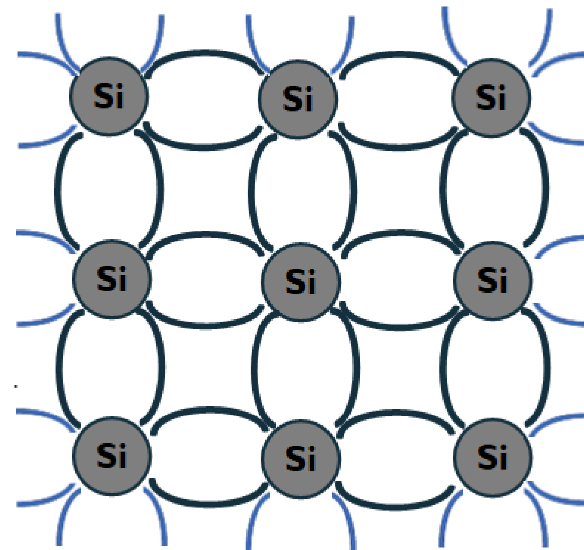
Uma estrutura cristalina pura de **silício** (Si) ou **germânio** (Ge) possui uma rede na qual cada átomo é ligado a quatro átomos adjacentes por pares de elétrons.

O cristal é quimicamente estável porque todas as camadas de valência ficam completas e também porque todos os elétrons de valência são retidos em uma ***ligação covalente***, o cristal é um isolante a temperatura de 0 K.

Tal cristal puro é denominado de **cristal intrínseco**.







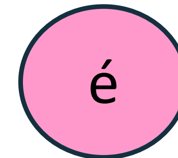
Tipos de impurezas

Para tornarmos o cristal um semicondutor para a confecção de componentes eletrônicos, devemos supri-lo de portadores livres, a fim de proporcionar um fluxo de corrente.

Isto é feito adicionando-se uma quantidade rigorosamente controlada de **impurezas** adequadas durante a formação do cristal.

Estas impurezas poderão ser:

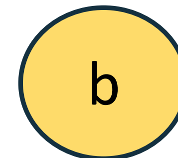
DOADORAS➔ excesso de elétrons. Exemplo: antimônio (Sb)



OU

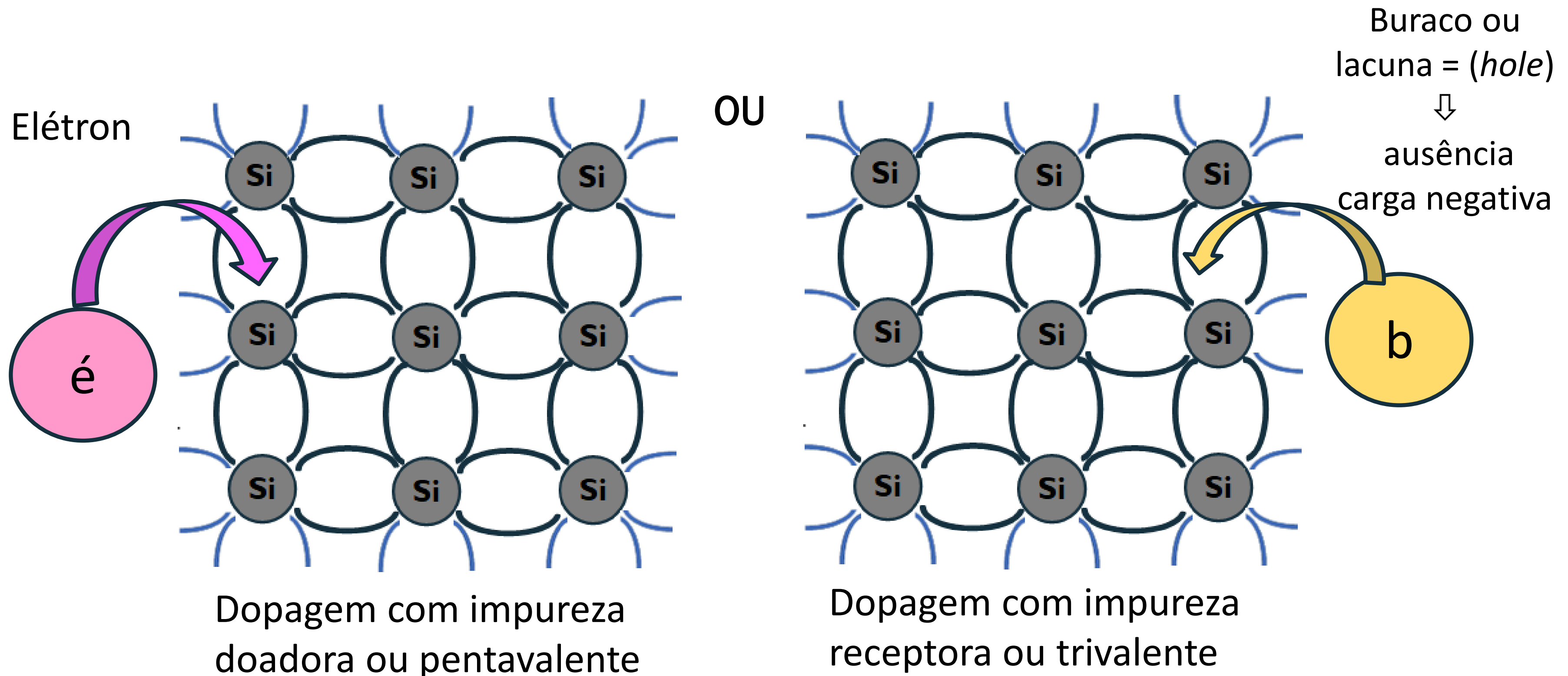
RECEPTORAS➔ falta de elétrons. Exemplo: índio (In), boro (B), gálio (Ga)

A ausência de elétrons é então denominada na eletrônica por:
lacuna, buraco ou *hole*.



Processo de dopagem ou “*dopping*”

O processo de adição de impurezas é denominado de: **<u>Dopagem</u>** ou “***<u>Dopping”</u>***.
A quantidade e o tipo de impurezas com as quais o cristal é dopado determinam suas características elétricas.



Dopagem com impureza doadora ou pentavalente

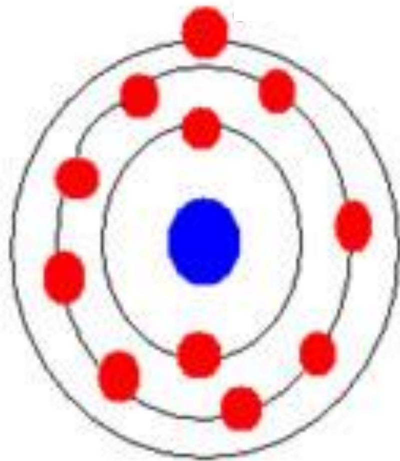
Dopagem com impureza receptora ou trivalente

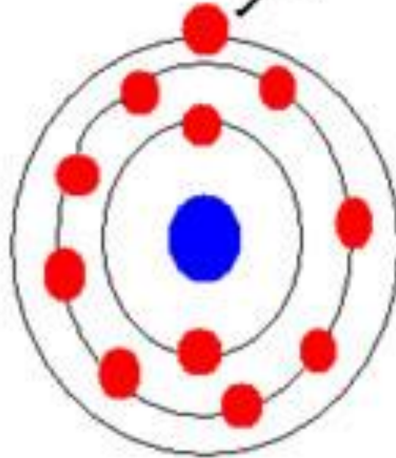
O cristal dopado passa a ser denominado de

cristal extrínseco.

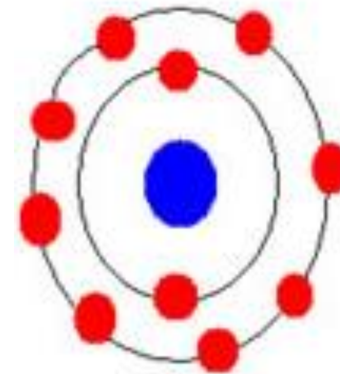
RELEMBRANDO: cátion

Átomo eletricamente neutro
Nº é = Nº p





Átomo desequilibrado eletricamente
Nº é < Nº p



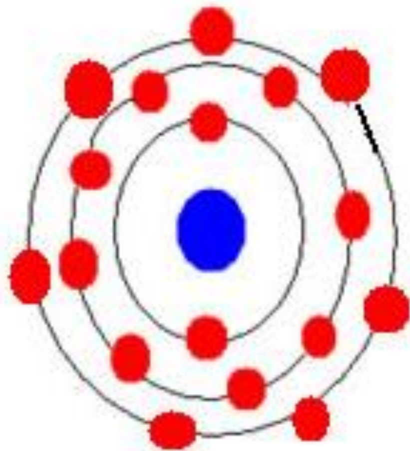
Átomo desequilibrado eletricamente:
íon positivo ➔CÁTION

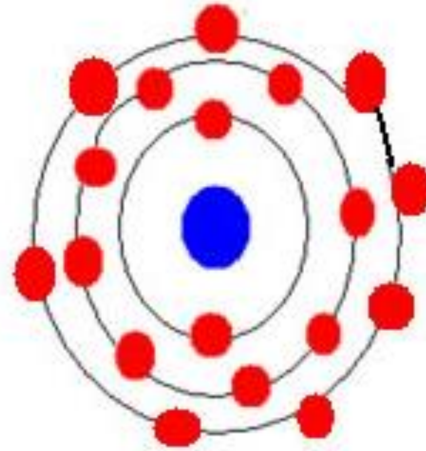


Como trata-se de um cristal, o íon é uma partícula fixa na estrutura cristalina, portanto sem a capacidade de movimento.

RELEMBRANDO: ânion

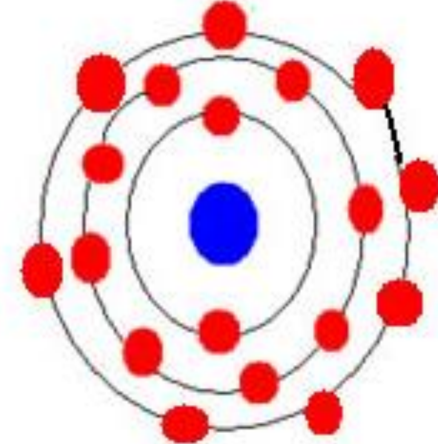
Átomo eletricamente neutro
Nº é = Nº p





ganha 1 e

Átomo desequilibrado eletricamente
Nº é > Nº p



Átomo desequilibrado eletricamente: íon negativo ➔ ÂNION

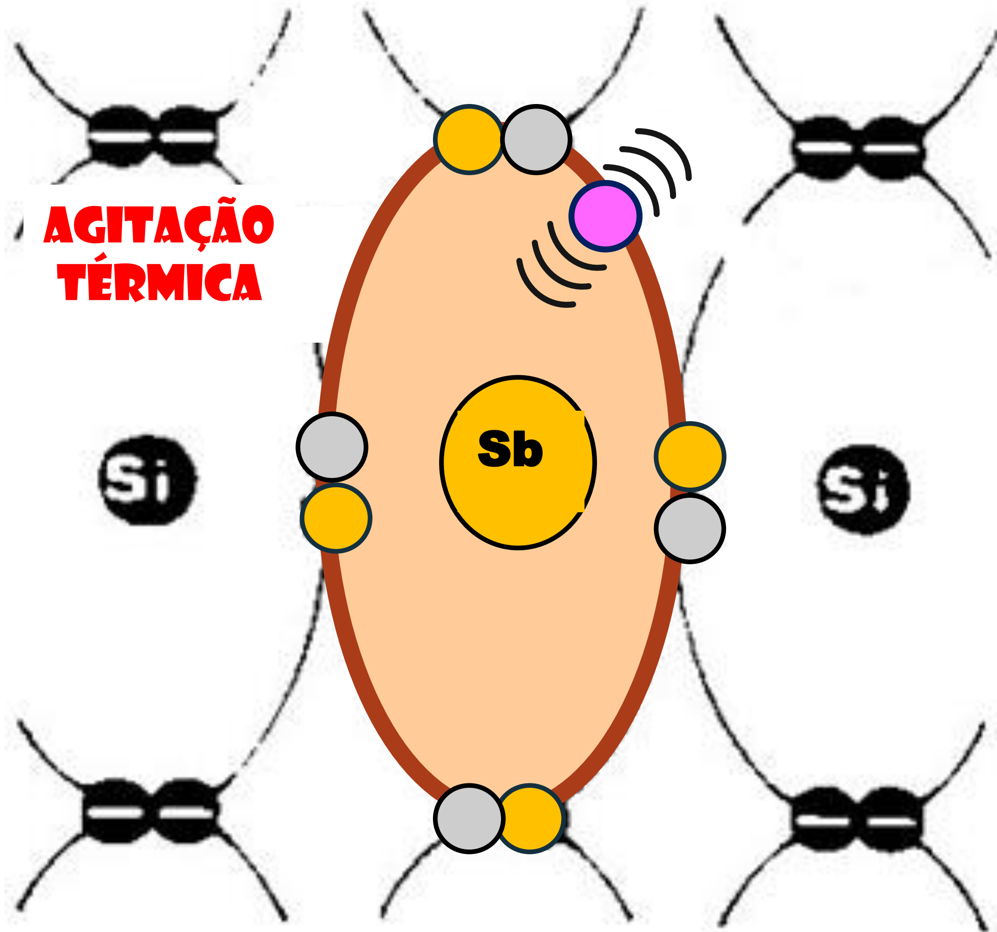
Como trata-se de um cristal, o íon é uma partícula fixa na estrutura cristalina, portanto <u>sem a capacidade de movimento</u>.

Formação CRISTAL tipo N

1-O cristal intrínseco é dopado com impureza contendo 5 elétrons na camada de valência no caso o antimônio (Sb).

Os quatro elétrons do antimônio (Sb) estão seguros na ligação covalente, ...
 2-como o quinto elétron não pertence ao arranjo cristalino, a única força que une ao seu átomo é comparativamente fraca.

3-Em temperaturas normais, a agitação térmica pode fornecer a este quinto é energia cinética.



Formação CRISTAL tipo N

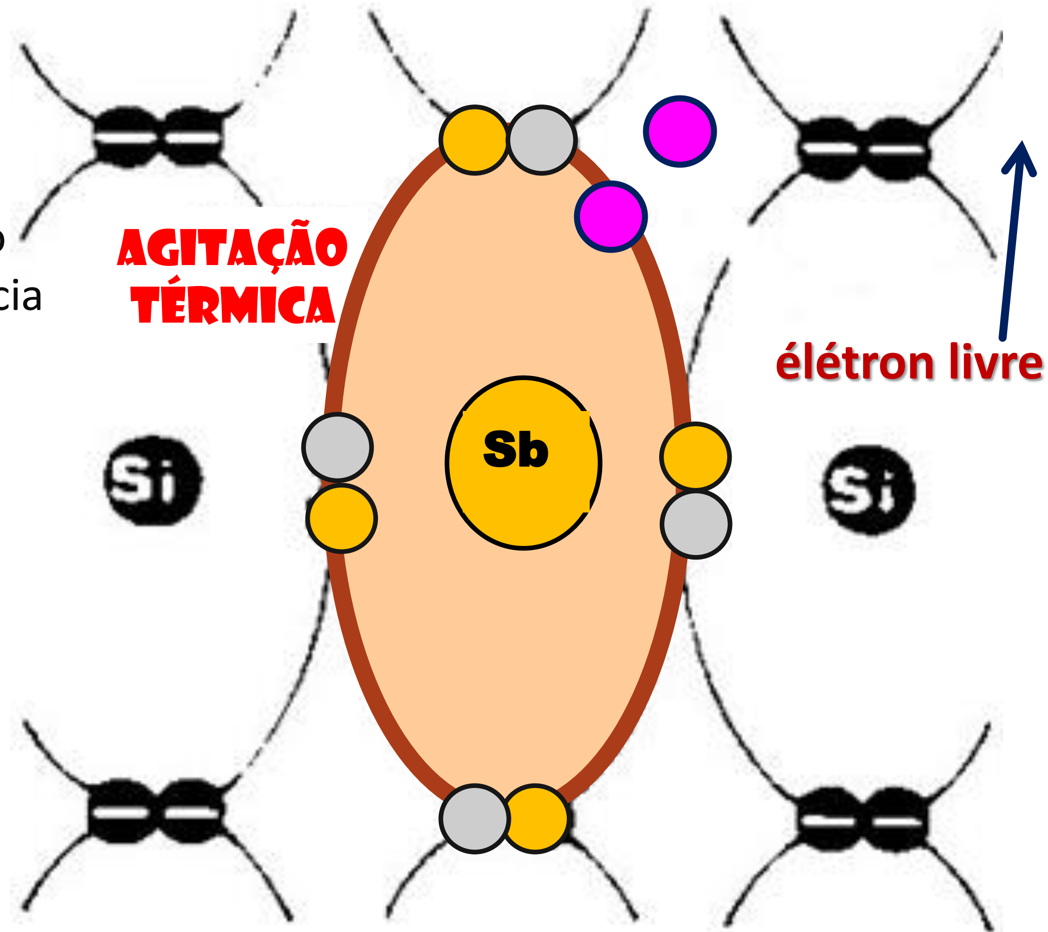
4-Esta energia cinética pode ser suficiente para superar a atração iônica, tornando-o livre para vaguear pela estrutura cristalina, denominado agora de **elétron livre**.

Desde que este **é** livre foi doado ao cristal pelo átomo de antimônio, essa substância passa a ser chamada de impureza

doadora

ou

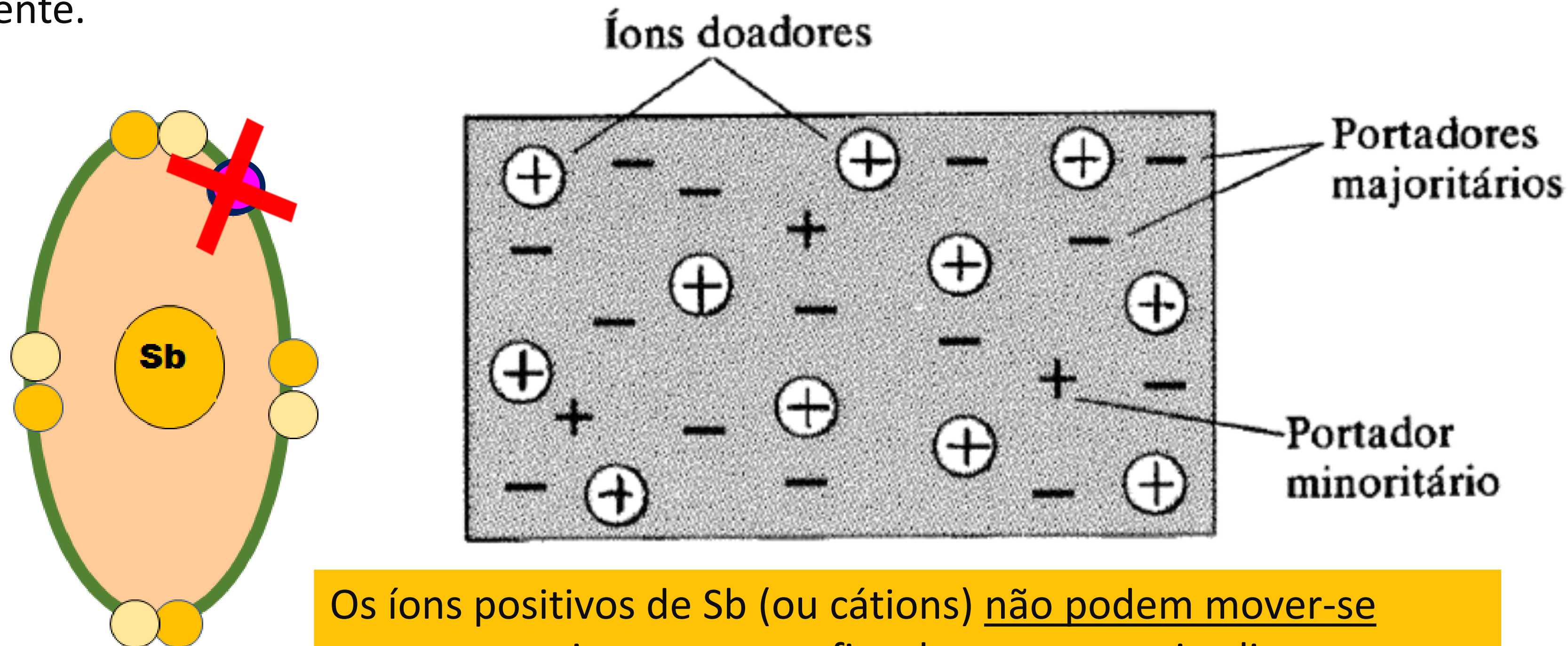
pentavalente.



O cristal tipo N

Desta forma, a estrutura cristalina é constituída pelos portadores **majoritários** que são os **elétrons livres** enquanto que os portadores **minoritários** são as **lacunas**.

Há um movimento aleatório pelo cristal devido a energia recebida pela temperatura ambiente.



Os íons positivos de Sb (ou cátions) <u>não podem mover-se</u> porque constituem a parte fixa da estrutura cristalina.

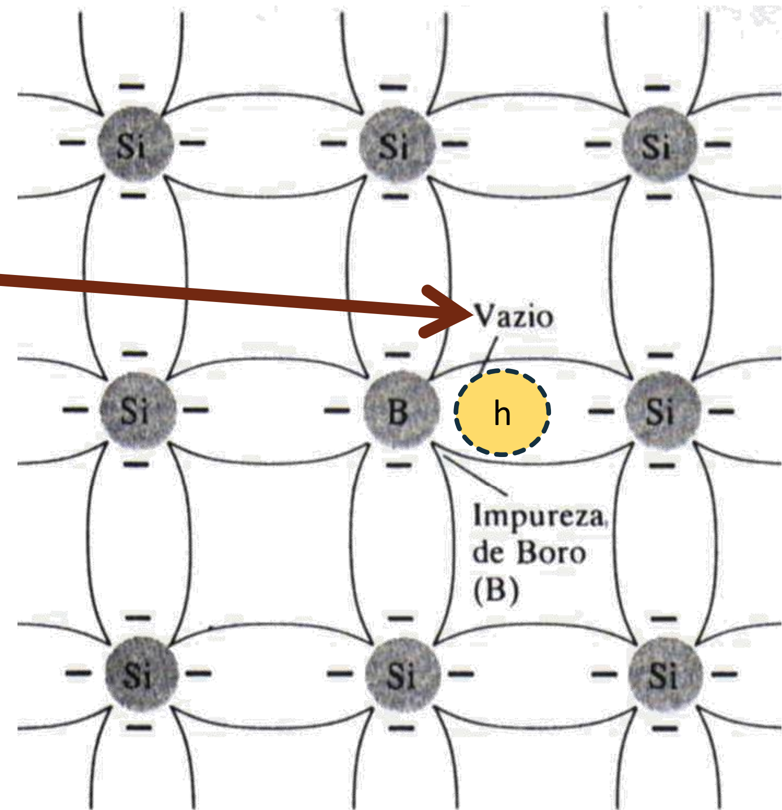
Portador minoritário: impureza de natureza positiva que não foi removido durante o processo de purificação do silício ou germânio. Limitações tecnológicas!

Formação Cristal tipo P

De forma análoga à construção do cristal tipo N, tem-se a produção do cristal tipo P, ou seja pelo processo de dopagem de um cristal intrínseco com impurezas **trivalentes** ou **receptores**, como Índio (In), Gálio (Ga) , Boro (B) ou Alumínio (Al).



A impureza trivalente ou receptora, ao entrar na estrutura cristalina procura estabelecer ligações covalentes com os quatro átomos do Si. A impureza trivalente permite a ligação covalente de 3 pares de elétrons, sendo que a quarta ligação fica incompleta.



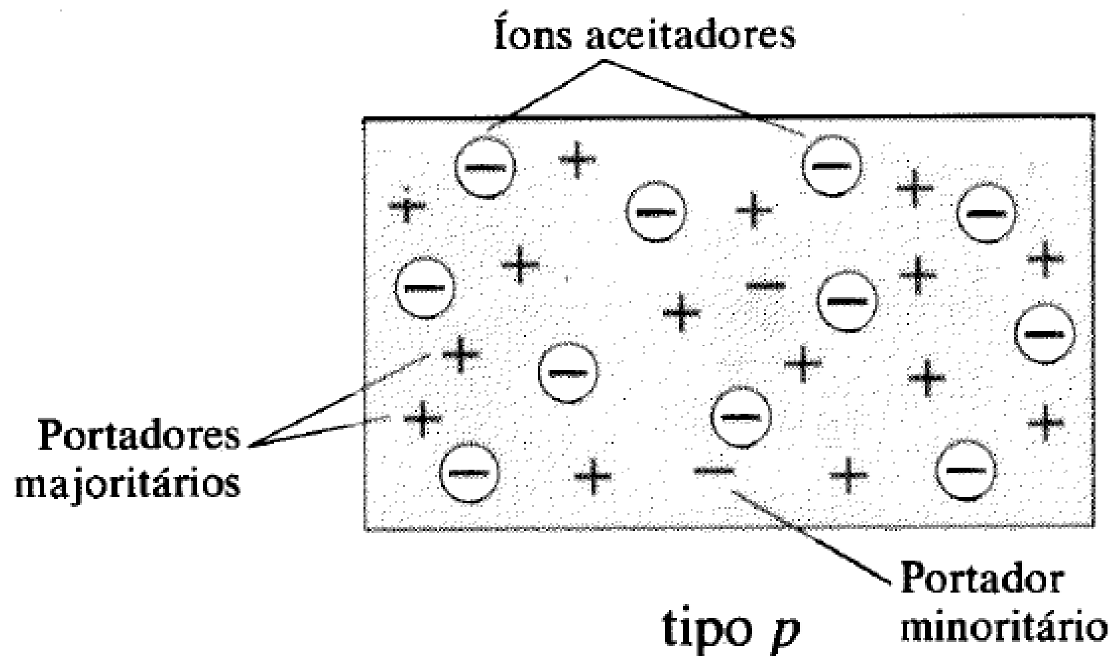
Esta imperfeição na ligação é chamada de **buraco,´*hole*´,** ou **lacuna**.

O conceito de lacuna descreve uma partícula fictícia com propriedades análogas ao do elétron, mas de carga positiva*.

*Porst, Alfred. Semicondutores. SIEMENS AG.

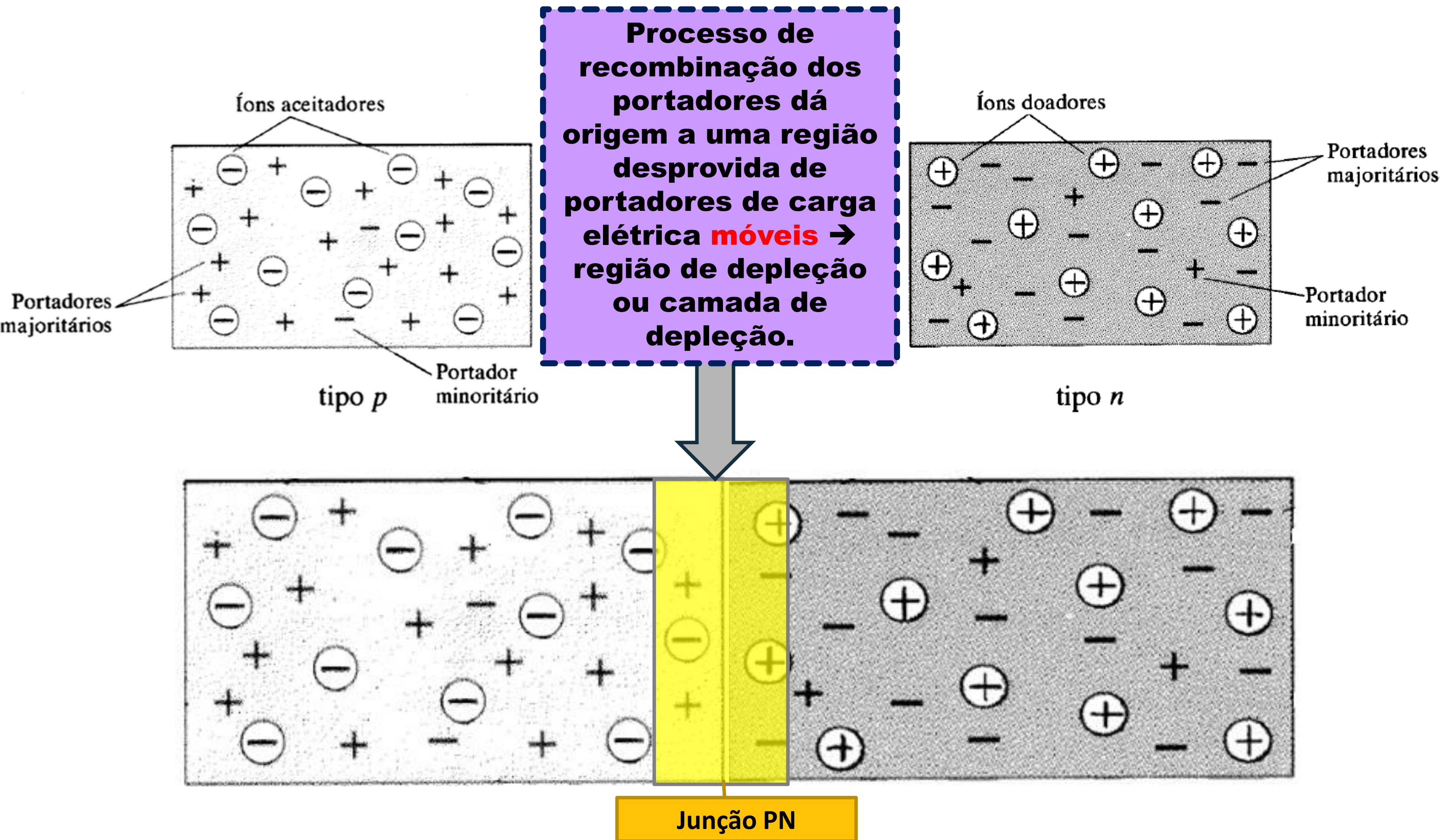
O Cristal tipo P

Os portadores **majoritários** são as **lacunas,** enquanto que os **minoritários** são os **elétrons livres**. De forma idêntica ao cristal tipo N, há um movimento aleatório dos portadores devido a energia recebida pela temperatura ambiente.



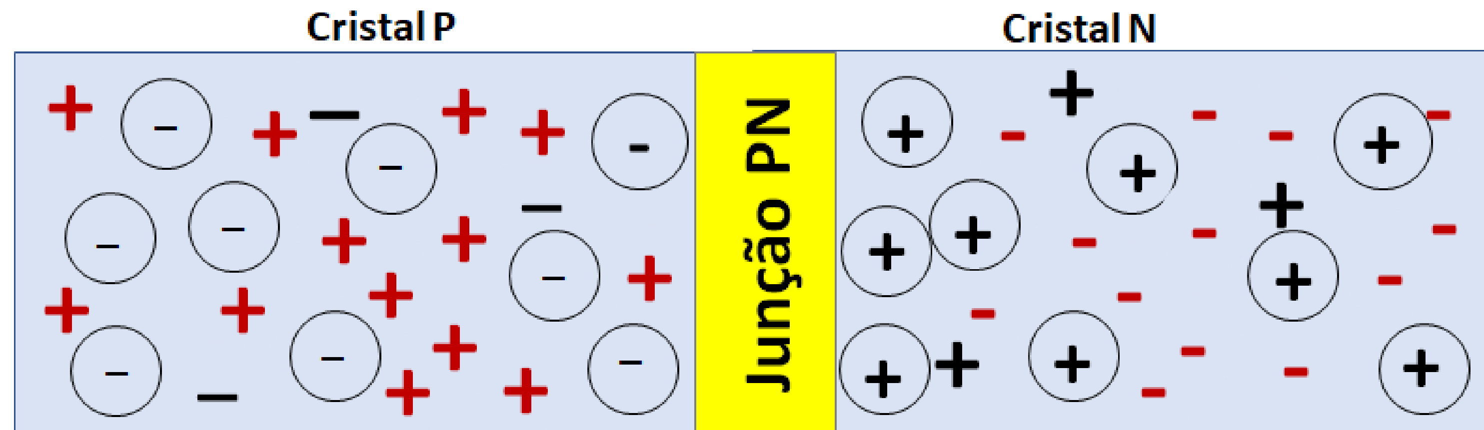
Os íons negativos de B (ou ânions) <u>não podem mover-se porque constituem a parte fixa da estrutura cristalina</u>.

Formação do diodo semicondutor



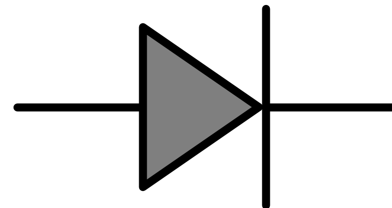
O diodo semicondutor

ESTRUTURA CRISTALINA SIMPLIFICADA



SÍMBOLO

TERMINAL DE ANODO
"A"



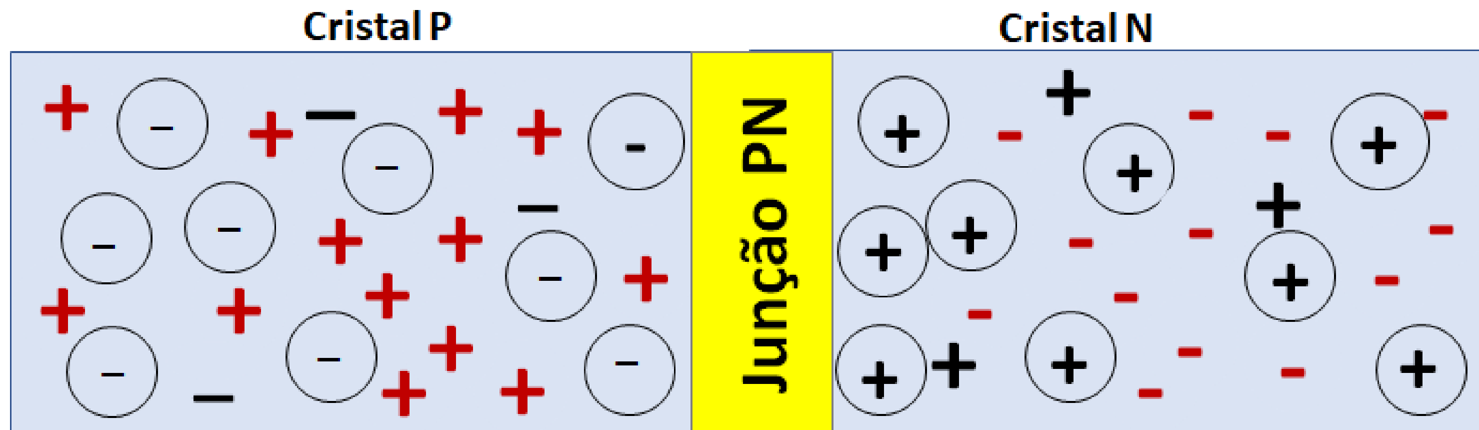
TERMINAL DE CATODO
"K"

ENCAPSULA-MENTO



Anel: identificação do terminal de catodo.

Junção PN & Recombinação & Camada de depleção

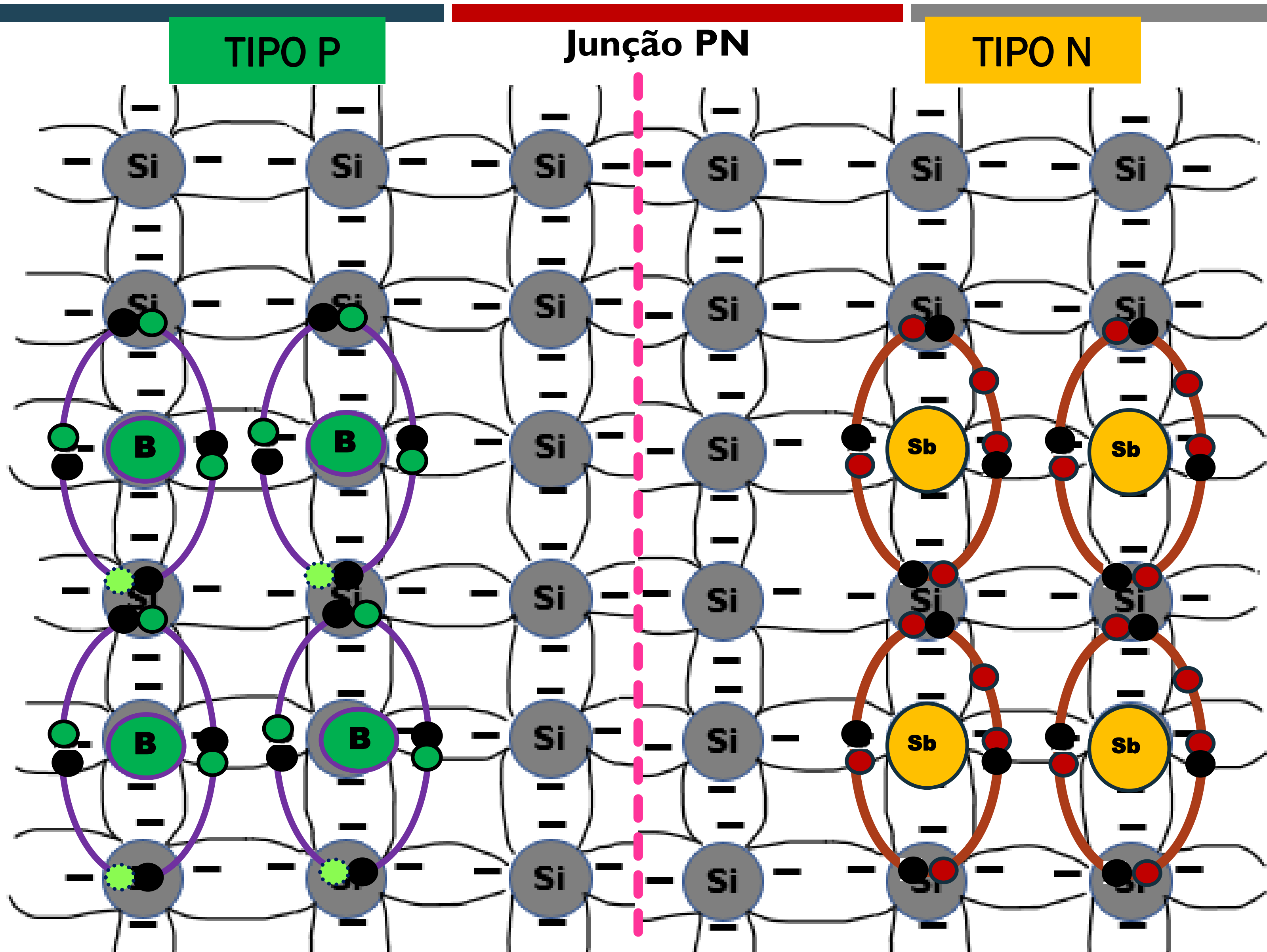


Junção PN: ocorre pela união dos cristais P e N.

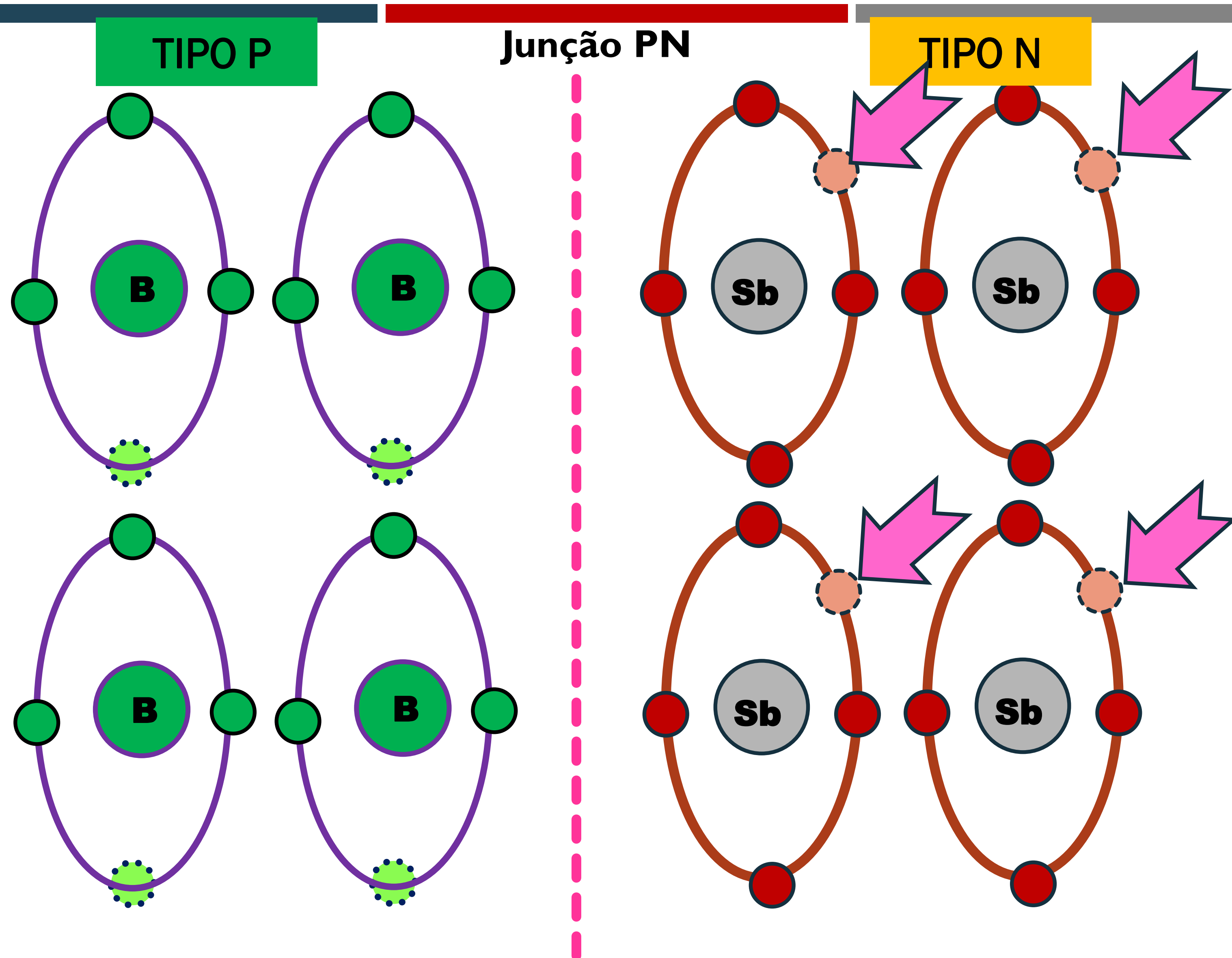
Recombinação: movimento das partículas livres entre dos dois cristais na tentativa de reestabelecer a estabilidade das ligações químicas, portanto uma corrente de recombinação. Ocorre no momento da união entre os cristais tipo P e tipo N.

Camada ou região de depleção: região desprovida de portadores de carga elétrica móveis.

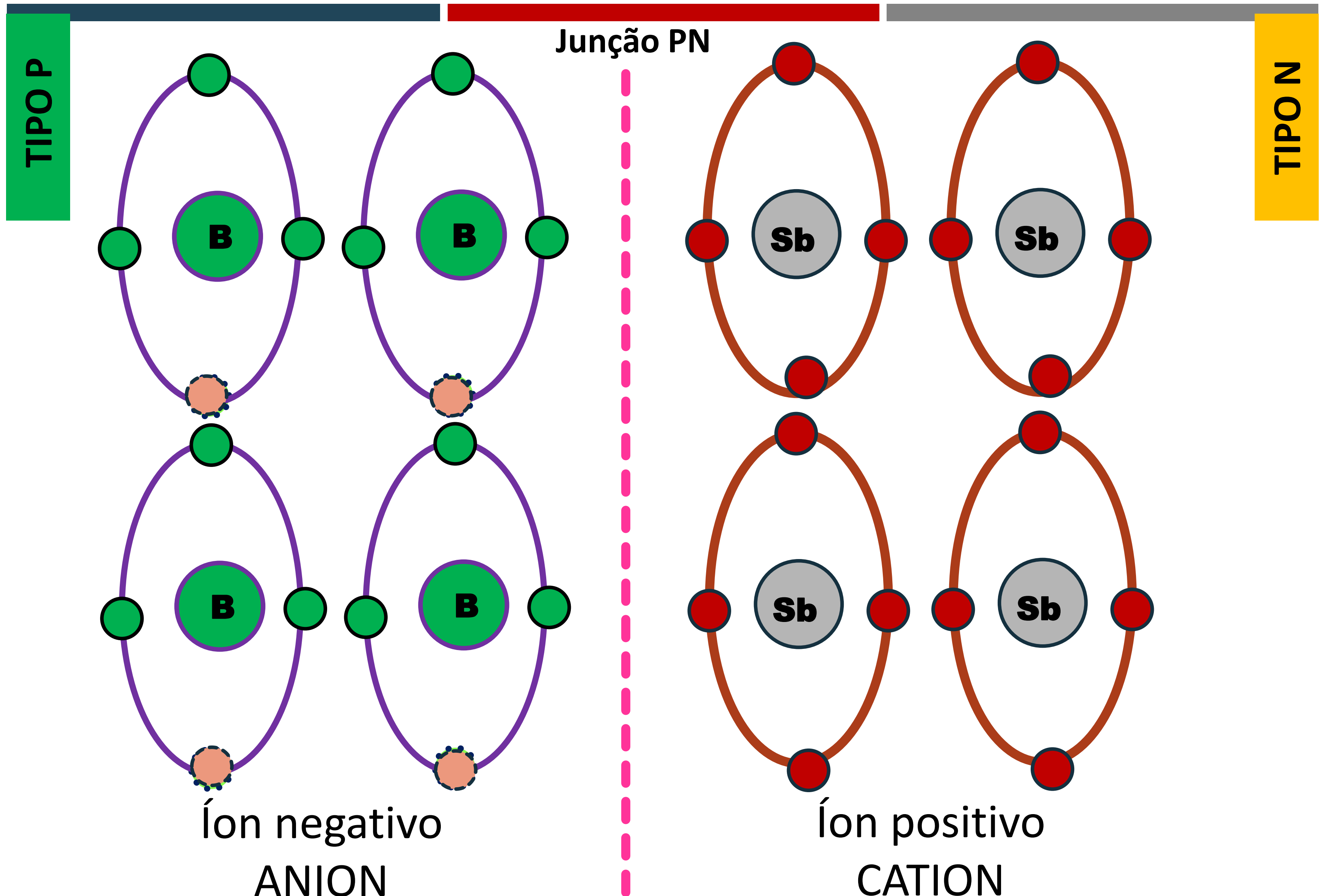
Detalhamento do processo de recombinação



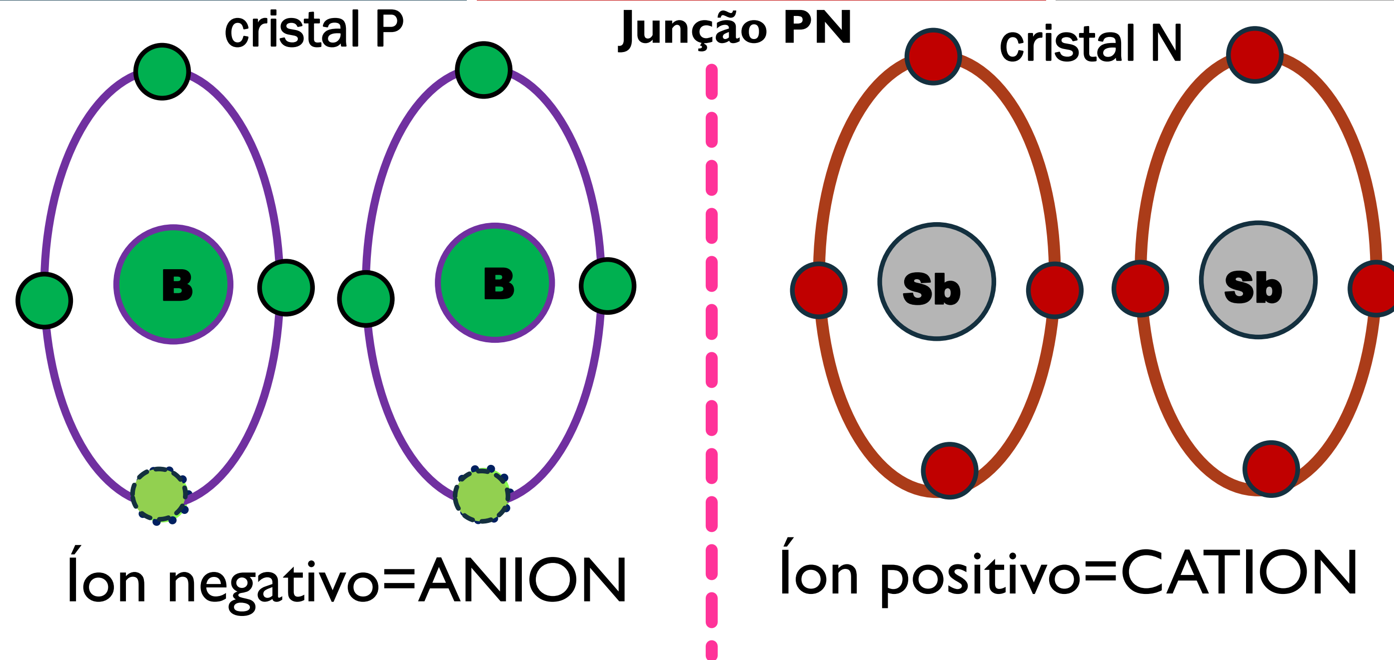
Detalhamento do processo recombinação



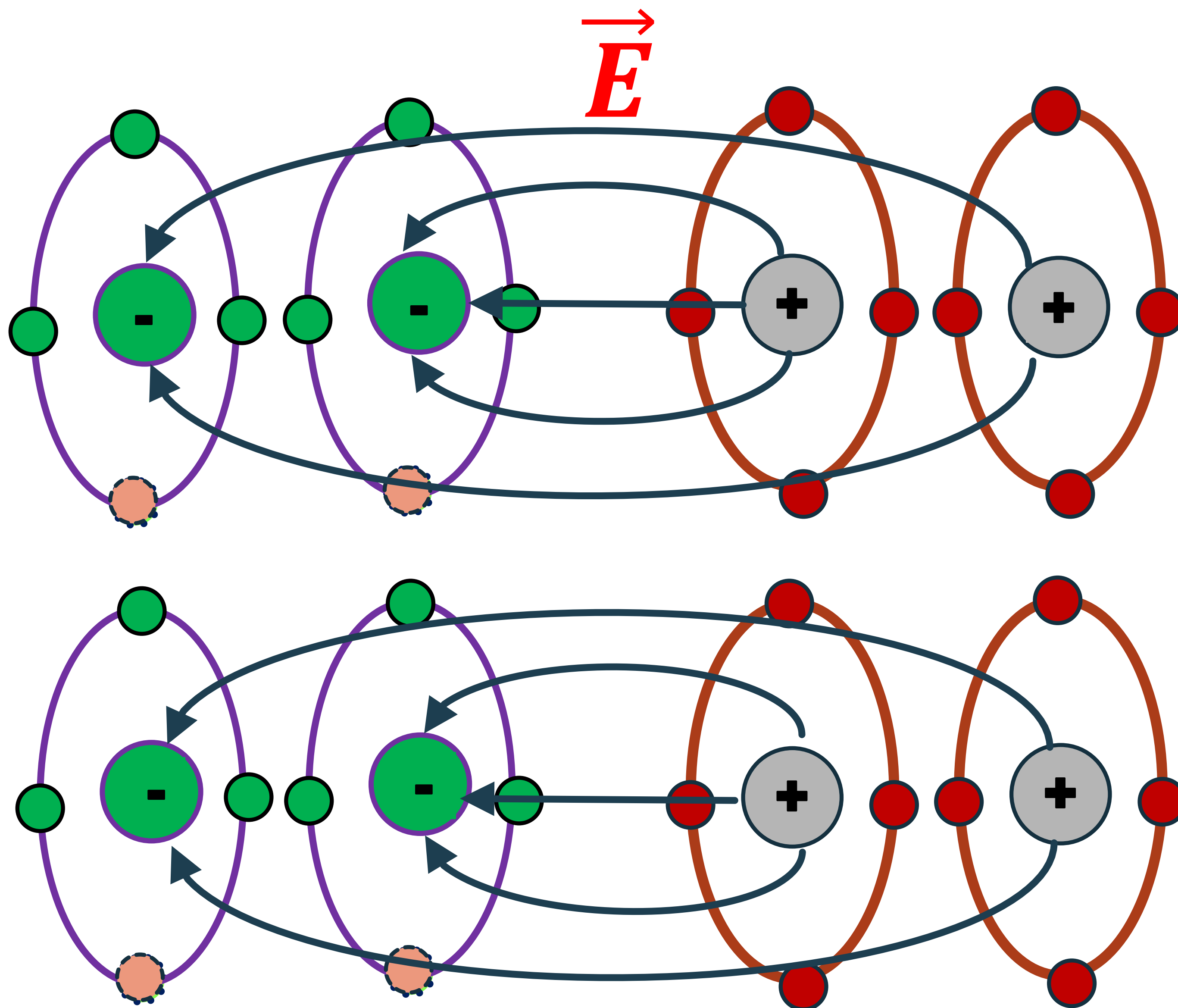
Detalhamento do processo de recombinação



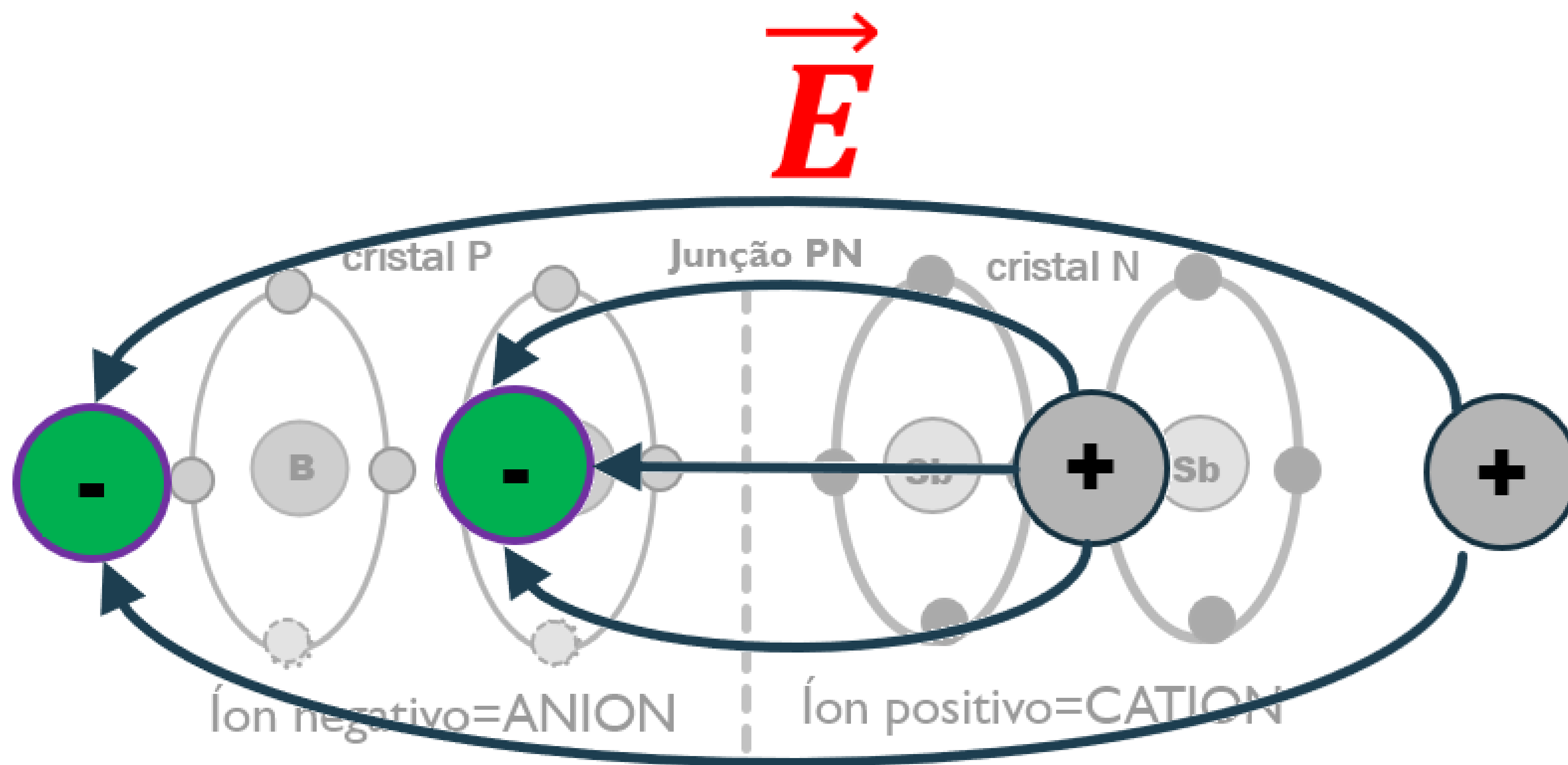
Processo de recombinação



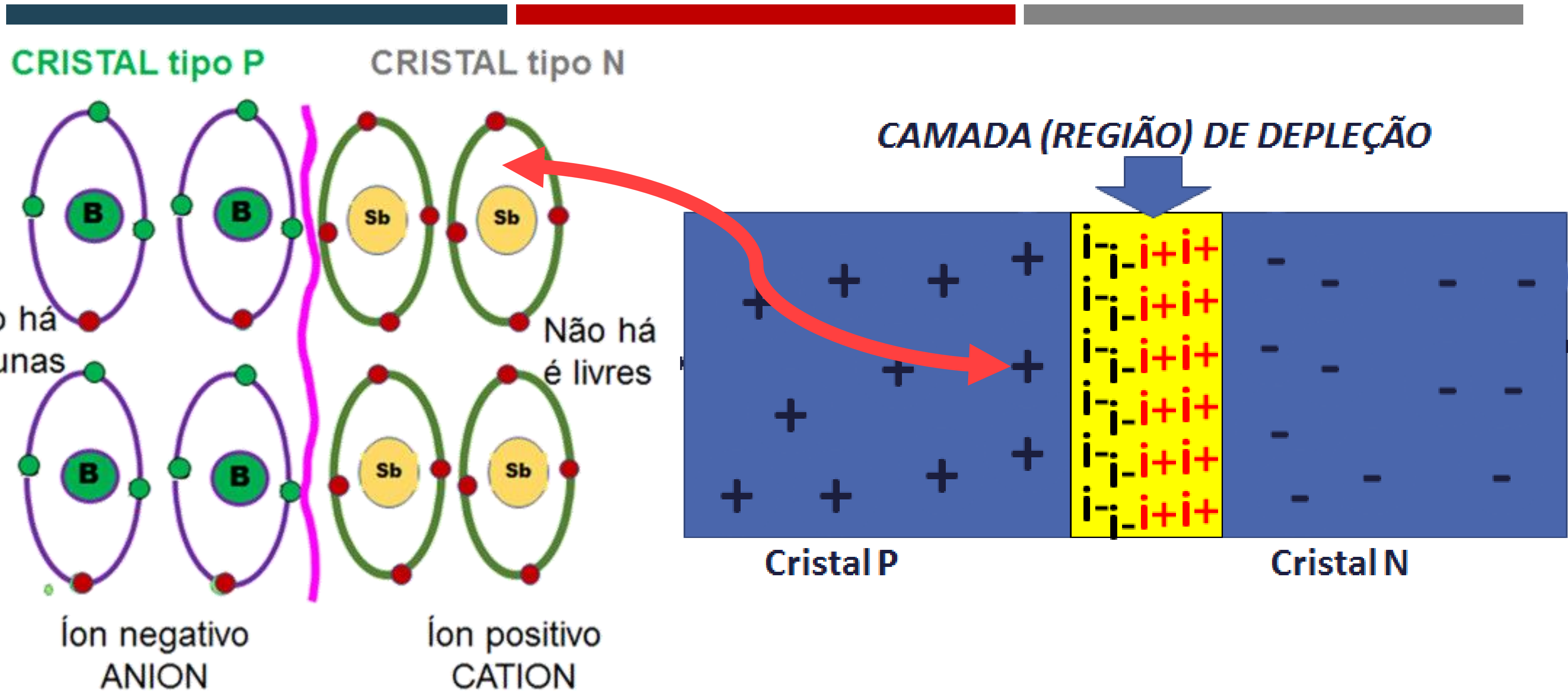
Processo de recombinação: campo elétrico



Processo de recombinação: campo elétrico resultante



Tensão da barreira de potencial



Tensão direta (V_F), Tensão da barreira de potencial ou **tensão de junção** (Vj), **tensão de limiar** ($V\gamma$) ou ainda **tensão de *threshold*** (V_{TH})).

Diodo de Si → V_F=0,7 V Diodo de Ge → V_F=0,3 V

Diodo real: família 1N4000 – folha de especificação = *datasheet*



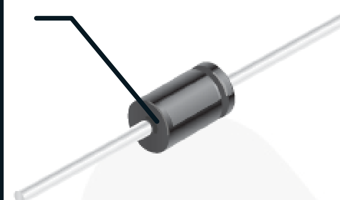
November 2014

1N4001 - 1N4007
General-Purpose Rectifiers

Features

- Low Forward Voltage Drop
- High Surge Current Capability

No corpo ou encapsulamento haverá a identificação do modelo.



DO-41

COLOR BAND DENOTES CATHODE

Ordering Information

Part Number	Top Mark	Package	Packing Method
1N4001	1N4001	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4002	1N4002	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4003	1N4003	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4004	1N4004	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4005	1N4005	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4006	1N4006	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4007	1N4007	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel

Diodo real: família 1N4000 – folha de especificação = *datasheet*



Diodo real: família 1N4000 – folha de especificação = *datasheet*

especificações

Absolute Maximum Ratings

Stresses exceeding the absolute maximum ratings may damage the device. The device may not function or be operable above the recommended operating conditions and stressing the parts to these levels is not recommended. In addition, extended exposure to stresses above the recommended operating conditions may affect device reliability. The absolute maximum ratings are stress ratings only. Values are at T_A = 25°C unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Value							Unit
		1N 4001	1N 4002	1N 4003	1N 4004	1N 4005	1N 4006	1N 4007	
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current .375 " Lead Length at T_A = 75°C	1.0							A
I_{FSM}	Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave	30							A
I^2t	Rating for Fusing (t < 8.3 ms)	3.7							A^2sec
T_{STG}	Storage Temperature Range	-55 to +175							°C
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to +175							°C

Diodo real: família 1N4000 – folha de especificação = *datasheet*

Thermal Characteristics

Values are at T_A = 25°C unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Value	Unit
P_D	Power Dissipation	3.0	W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	50	°C/W

Electrical Characteristics

Values are at T_A = 25°C unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Conditions	Value	Unit
V_F	Forward Voltage	I_F = 1.0 A	1.1	V
I_{rr}	Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle	T_A = 75°C	30	µA
I_R	Reverse Current at Rated V_R	T_A = 25°C	5.0	µA
		T_A = 100°C	50	
C_T	Total Capacitance	V_R = 4.0 V, f = 1.0 MHz	15	pF

Comentário da professora sobre valor da tensão direta datasheet x valor padrão das aulas!

O valor informado pelo fabricante é obtido em condições que são especificadas no datasheet. Para o exemplo em estudo o valor de 1,1 V é para quando a corrente que circula pelo diodo é de 1,0 A. Este valor normalmente não é o usado para realização de cálculos e estimativas.

Já o valor de 0,7 V para o diodo de silício, representa "o potencial direto necessário" para que o diodo entre em condução = chave eletrônica fechada. Representa um cenário próximo ao real.
O valor de 0,7 V (Si) e 0,3 V (Ge) é valor TEÓRICO que os autores adotam no estudo deste componente.
O valor prático é dependente principalmente da temperatura de operação do componente.
Na experiência do levantamento da curva característica do diodo, teremos a oportunidade de constatar o valor da tensão direta real do diodo sob estudo.